

ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌های بتنی درجا در ماسه با کمک نتایج آزمایش بارگذاری

عیسی شوش‌پاشا* (استادیار)

مهدی شرف‌خواه (کارشناس اشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل

مهندسی عمران شریفه، (پاییز ۱۳۹۳)
دربی ۲-۳، شماره ۳، ص. ۸۳-۷۵

دقیق‌ترین روش تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها، استفاده از آزمایش بارگذاری است. روش‌های متعددی به منظور تفسیر نتایج آزمایش بارگذاری شمع‌ها و تخمین ظرفیت باربری آنها وجود دارد. در این مطالعه، ابتدا ۱۲ عدد شمع با قطر متفاوت و در ۴ دسته با مقیاس آزمایشگاهی در سائیتی متشکل از خاک ماسه‌یی واقع در حاشیه‌ی جنوبی دریای خزر اجرا و آزمایش بارگذاری بر روی آنها انجام شد. سپس با استفاده از منحنی بار-نشست حاصل از آزمایش و روش‌های تجربی موجود، ظرفیت باربری شمع‌ها تخمین زده شد و نتایج این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که روش Chin اعداد ظرفیت باربری را به مراتب بیشتر از میانگین نتایج در این تحقیق به دست می‌دهد، از طرفی دیگر روش Davisson جهت تعیین ظرفیت باربری نهایی، کم‌ترین مقادیر را در اختیار قرار داده است. روش Terzaghi اعداد منطقی‌تری را در این مطالعه نشان داده است. در نهایت با کمک آزمایش‌های بارگذاری انجام شده، نتایج قابل اطمینانی از شمع‌ها به دست آمده است که می‌تواند مورد استفاده پژوهشگران قرار گیرد.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری فشاری، شمع‌های بتنی درجا، ماسه، آزمایش بارگذاری شمع.

shooshpasha@nit.ac.ir
mehdisharafkhah@gmail.com

۱. مقدمه

تجهیزات آزمایش به تجهیزات اعمال بار و اندازه‌گیری آن و نیز تجهیزات اندازه‌گیری تغییرمکان و جابجایی شمع‌ها تقسیم می‌شود. مهندسان و پژوهشگران روش‌های متفاوتی را برای انجام آزمایش بارگذاری به کار برده‌اند که در انتشارات مختلف گزارش شده است. از میان این سری آزمایش‌ها، آزمایش با بار دائمی آهسته (SM)، آزمایش با بار دائمی سریع (QM)، آزمایش با نرخ نفوذ ثابت (CRP) و آزمایش دوره‌یی سوئدی (SC) بیشترین کاربرد را دارند.

تفاوت عمده‌ی این روش‌ها در سرعت بارگذاری است. در پژوهشی با انجام آزمایش بارگذاری بر روی یک گروه شمع در ماسه، اثر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری گروه شمع بررسی و نشان داده شد که با افزایش سرعت بارگذاری، ظرفیت باربری گروه شمع افزایش می‌یابد.^[۱]

با کمک نتایج آزمایش بارگذاری به همراه نصب نیروسنج در جداره و نوک شمع می‌توان علاوه بر ظرفیت باربری کل، به ظرفیت باربری نهایی جداره و نیز ظرفیت باربری نهایی نوک شمع نیز پی برد. همچنین در مطالعه‌یی با کمک آزمایش بارگذاری به همراه مدل‌سازی عددی و روش بار-انتقال نشان داده شد که مقاومت جداره به ازاء نشست ۵ تا ۲ درصد قطر شمع به مقدار بیشینه خود می‌رسد، ولی مقاومت نوک به ازاء ۵ تا ۱۰ درصد نشست به مقدار بیشینه خواهد رسید.^[۲]

یکی از بخش‌های مهم آزمایش بارگذاری، بخش تفسیر نتایج است. در این

محاسبه‌ی ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها به چندین روش ممکن است. این روش‌ها عبارت‌اند از: تحلیل استاتیکی با کمک مقاومت خاک، آزمایش بارگذاری شمع، تحلیل تجربی با کمک آزمایش‌های صحرایی مانند آزمایش نفوذ استاندارد، آزمایش نفوذ مخروط و آزمایش فشارسنج. در پروژه‌های با اهمیت استفاده از این روش‌ها به همراه آزمایش بارگذاری قابل توجیه است. به‌طور کلی می‌توان گفت، جهت تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها، آزمایش بارگذاری نسبت به سایر روش‌ها دارای اطمینان بیشتری است و در صورتی که درست انجام شود و اطمینان خوبی از نتایج حاصل شود، می‌توان ضریب اطمینان طراحی شمع‌ها را کاهش داد. از معایب این روش می‌توان به هزینه‌ی زیاد برای تهیه‌ی تجهیزات آزمایش در مقیاس واقعی نام برد.

برخی از نتایج آزمایش بارگذاری در ماسه، در پژوهش‌های مختلفی ارائه شده و قابل دسترسی است. در مطالعه‌یی با کمک یک آنالیز تحلیلی-تجربی، روشی جهت محاسبه‌ی نشست و توزیع تنش در جداره‌ی شمع بر مبنای نتایج بارگذاری ۱۰ شمع ارائه شد.^[۱] همچنین در پژوهشی دیگر نتایج تخمین بار نهایی شمع‌های حاصل از ۴۳ آزمایش بارگذاری در خاک ماسه‌یی با نتایج تخمین ظرفیت باربری با کمک روش‌های موجود مقایسه شد.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۶/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۲/۱۵، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۳.

مرحله، منحنی بار- نشست شمع در دست است و هدف استخراج برخی اطلاعات از این منحنی است. مهم‌ترین کمیتی که از این منحنی به دست آورده می‌شود، مقدار ظرفیت باربری نهایی یا همان بار نهایی شمع‌هاست. اما این نقطه از روی منحنی به سادگی قابل تشخیص نیست و روی آن اختلاف نظر فراوانی وجود دارد. پژوهشگران متعددی تلاش کرده‌اند تا با کمک روش‌هایی، بار نهایی شمع‌ها را تخمین بزنند که در ادامه، به برخی از این روش‌ها اشاره شده است.

در این مطالعه، ۱۲ عدد شمع در ۴ دسته با قطر متفاوت و در مقیاس آزمایشگاهی در سائیتی متشکل از خاک ماسه‌ای واقع در حاشیه‌ی جنوبی دریای خزر اجرا و آزمایش بارگذاری بر روی آنها انجام شد. سپس با استفاده از منحنی بار- نشست حاصل از آزمایش و روش‌های تجربی موجود، ظرفیت باربری شمع‌ها تخمین زده شد. در پایان نتایج این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. پژوهشگرانی نیز پژوهشی مشابه را بر روی اطلاعات موجود ۶۴ عدد شمع در ۲۰ سایت مختلف در مصر انجام داده‌اند.^[۵]

۲. تخمین بار نهایی شمع‌ها با کمک نتایج آزمایش بارگذاری

در انجام آزمایش بارگذاری شمع زمانی فرا می‌رسد که با افزایش جزئی بار، نشست زیادی رخ می‌دهد و اصطلاحاً شمع در خاک فرو می‌رود. بارگسیختگی، مقدار باری است که باعث افزایش سریع تغییر مکان شمع می‌شود. انتخاب این بار بیشتر با قضاوت مهندسی انجام می‌شود. پژوهشگران روش‌های متعددی را جهت تخمین ظرفیت باربری نهایی از روی منحنی بارگذاری پیشنهاد کرده‌اند.

Terzaghi بارگسیختگی را با برآیند بار با ۱۰٪ قطر شمع تعریف می‌کند.^[۶] Davisson نیز برای تعیین محل بارگسیختگی، روش زیر را ارائه کرده است:^[۷]

ابتدا خط OA براساس رابطه‌ی کشسان $\Delta = (Qva)L/AE$ بر روی منحنی بار- نشست شمع ترسیم می‌شود، به طوری که Qva بار وارده، L طول شمع، A و E به ترتیب سطح مقطع و مدول کشسانی شمع و Δ نشست شمع است (شکل ۱). سپس خط BC به موازات OA و به فاصله‌ی x از آن رسم می‌شود، به طوری که $x = 0.15 + D/12$ in و D قطر شمع است. بارگسیختگی به این ترتیب محل تقاطع BC با منحنی بارگذاری است.

روش دیگری که بین مهندسان رایج است و برای تعیین بار نهایی شمع‌ها استفاده

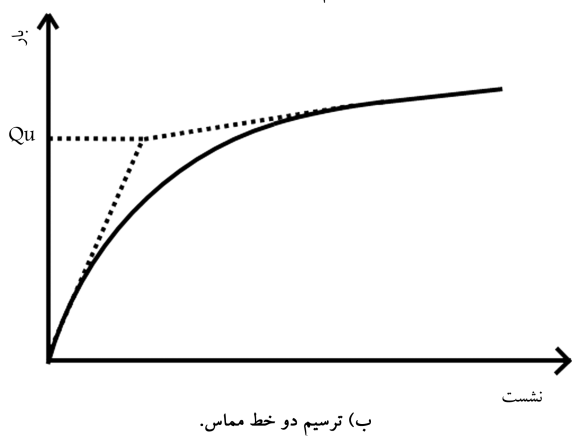
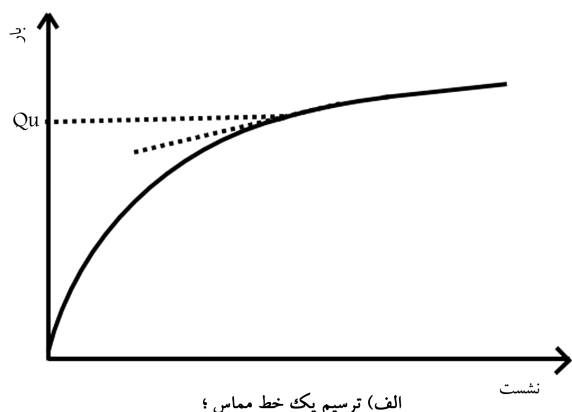
می‌شود، به این صورت است که نقطه‌ی را که منحنی بارگذاری در آن جا به حالت خطی تغییر وضعیت می‌دهد، را به عنوان بار نهایی شمع انتخاب می‌کنند. برخی نیز مماس‌هایی بر منحنی در قسمت شروع و قسمت پایانی ترسیم و محل تلاقی این دو خط را به عنوان بار نهایی شمع انتخاب می‌کنند. این دو روش در شکل ۲ نشان داده شده است، که در آن، Q_u بار نهایی شمع است.

پژوهشگرانی نیز نشان داده‌اند که روش Davisson برای شمع‌های بتنی درجا در خاک ماسه‌ای تمیز خیلی محافظه‌کارانه است و این مسئله را به عنوان یکی از ضعف‌های این روش بیان کرده‌اند.^[۸]

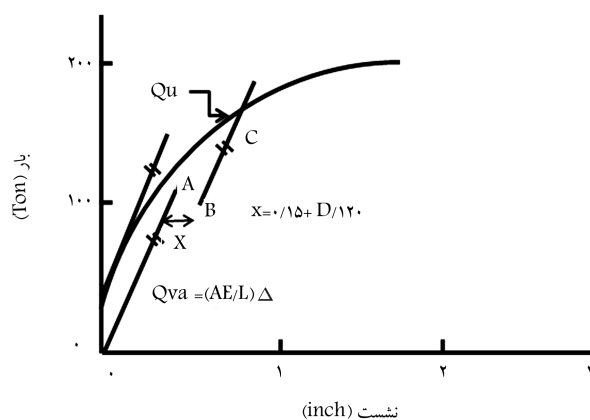
برخی پژوهشگران نیز معتقدند که خط کشسان OA سختی شمع‌های کوتاه را دست‌بالا و شمع‌های بلند را دست‌پایین تخمین می‌زند.^[۹] در مطالعه‌ی نیز نشان داده شده است که محل خط BC برای شمع‌های کوبیدنی که خاک زیر نوک شمع تحت اثر کوبش متراکم می‌شود، مناسب است، و برای شمع‌های درجا که خاک زیر نوک شمع متراکم نشده است، در اثر نشست بیشتری به مقاومت نهایی خود می‌رسند.^[۱۰]

در پژوهش دیگری نیز برای تعیین بار نهایی گسیختگی شمع پیشنهاد شد که منحنی Δ/Q نسبت به Δ ترسیم شود، که Δ جابجایی و Q بار متناظر با آن است. مقدار عکس شیب بهترین خط برازش شده در انتهای این منحنی برابر با بارگسیختگی شمع است. نحوه‌ی تعیین بارگسیختگی و متغیرهای این روش در شکل ۳ نشان داده شده است.^[۱۱،۱۲]

همچنین در مطالعه‌ی دیگر روشی مشابه روش پژوهش قبلی، جهت تخمین ظرفیت باربری شمع ارائه شد، با این تفاوت که در محور افقی به جای نشست، از بار



شکل ۲. روش ترسیم خطوط مماس.

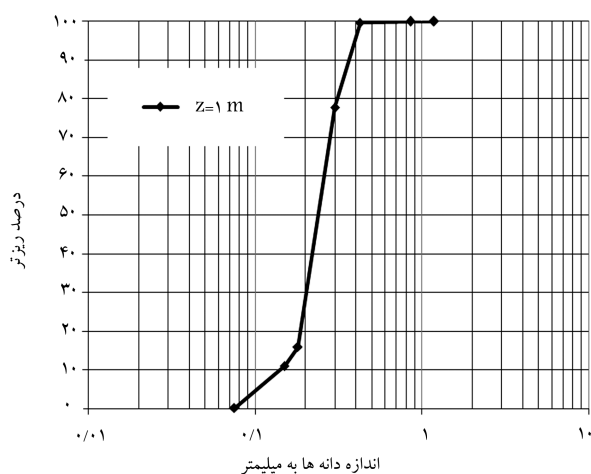


شکل ۳. روش Davisson.^[۷]

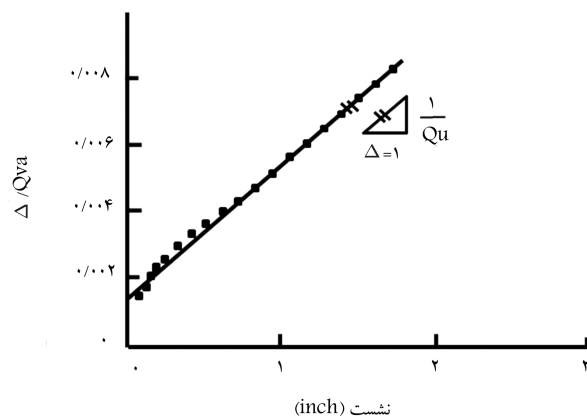
است. از آنجا که بررسی اثر آب زیرزمینی مورد بحث قرار نخواهد گرفت، از این رو محل آزمایش و زمان انجام آن به گونه‌بی انتخاب شده است که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از نوک شمع‌ها قرار گیرد. در هنگام انجام آزمایش تراز آب زیرزمینی در عمق حدود ۵ متری از سطح زمین قرار گرفته است.

این منطقه طبق تقسیم‌های زمین‌شناسی کشور در منطقه گرگان - رشت واقع شده است. از نظر رسوب‌های زمین‌شناسی شامل رسوب‌های دوره‌ی پالئوژن و دوره‌ی چهارم زمین‌شناسی است. از آنجا که خاک این منطقه، یک نهشته‌ی ساحلی است؛ از این رو تحت اثر حرکات تلاطمی آب قرار داشته است و این حرکات باعث شکل‌دادن و تولید این نهشته‌ی ساحلی شده است. از این رو در فاصله‌ی قابل ملاحظه‌ی از دریا، خاک‌ها ساختار نسبتاً منظمی از لحاظ چگالی نسبی و استحکام دارند. البته در برخی از نقاط ممکن است این نظم با ورود نهشته‌های رودخانه‌ی از بین برود. آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش شامل دو دسته آزمایش‌های محلی و آزمایشگاهی است. روی نمونه‌هایی که در هنگام حفاری شمع‌ها تهیه شده است، آزمایش درصد رطوبت طبق استاندارد ۹۸ - ASTM D ۲۲۱۶، آزمایش تعیین چگالی دانه‌ها طبق استاندارد ۸۵۴ - ASTM D، آزمایش دانه‌بندی به کمک الک طبق استاندارد ۴۲۲ - ASTM D، آزمایش طبقه‌بندی خاک به روش یونیفاید طبق استاندارد ۲۴۸۷ - ASTM D و آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد ۳۰۸۰ - ASTM D انجام شده است.^[۱۹] منحنی دانه‌بندی خاک در عمق ۱ متری در شکل ۵ نشان داده شده است.

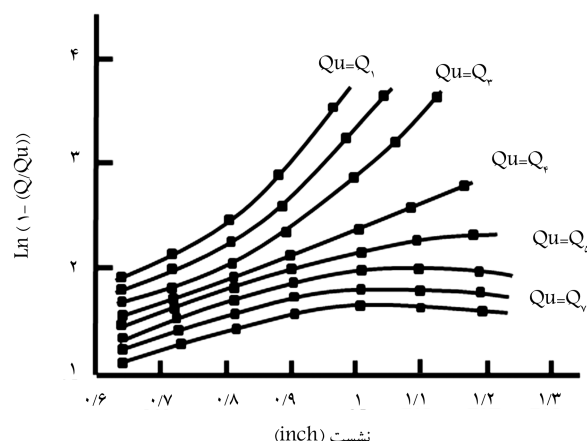
آزمایش‌های محلی شامل آزمایش تعیین وزن مخصوص در محل طبق استاندارد ۱۵۵۶ - ASTM D و آزمایش نفوذ استاندارد طبق ۱۵۸۶ - ASTM D نیز انجام شده است.^[۱۹] آزمایش تعیین وزن مخصوص ماسه در محل (مخروط ماسه‌یی) با حفر ۳ گودال به عمق ۱ متر در سایت موردنظر انجام و سپس آزمایش تعیین درصد رطوبت بر روی نمونه‌ها صورت گرفته و در نهایت با متوسط‌گیری از نتایج ۳ آزمایش، γ_{dry} و γ_{wet} موردنظر حاصل شده است. مقدار ϕ نیز با متوسط‌گیری از نتایج ۳ آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های بازسازی‌شده با وزن مخصوص مشابه در محل به دست آمده است. مقادیر متوسط پارامترهای خاک، که از آزمایش‌های فوق به دست آمده است، در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. خاک محل در گروه SP در طبقه‌بندی یونیفاید قرار دارد. تغییرات عدد نفوذ استاندارد نسبت به عمق در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی خاک در عمق ۱ متری.



شکل ۳. روش Chin.^[۱۲ و ۱۱]



شکل ۴. روش Vander Veen.^[۱۴]

وارد به شمع استفاده شده است. در این روش فرض شده است که منحنی بار - نشست تقریباً هیپربولیک است. این روش هم برای آزمایش آهسته‌ی SM و هم برای آزمایش سریع QM استفاده می‌شود.^[۱۳] و نیز در پژوهش دیگری^[۱۲] روشی ارائه شده که بعدها توسط برخی پژوهشگران^[۱۵ و ۱۶] هم پیشنهاد شد،^[۱۴] به این صورت که ابتدا یک مقدار برای بار نهایی Q_u فرض و سپس منحنی $|\ln[1 - (Q/Q_u)]|$ نسبت به جابجایی ترسیم می‌شود. در این رابطه، Q بار متناظر با هر جابجایی در آزمایش بارگذاری است. سپس آنقدر مقدار Q_u تغییر داده می‌شود تا منحنی به صورت خطی در بیاید. بار نهایی انتخابی که این منحنی را به صورت خطی تبدیل کند، بار نهایی گسیختگی شمع است. این روش در شکل ۴ نشان داده شده است.

پژوهشگرانی نیز روش‌های تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند،^[۱۷ و ۱۸] و به نظر ایشان تخمین ظرفیت باربری با کمک روش‌های رایج کار دشواری است. در پروژه‌های مهم‌تر لازم است تا هزینه‌ی بیشتری صرف کرد و از ابزارگذاری در جداره و نوک شمع استفاده کرد. همچنین تخمین ظرفیت باربری با معیار نشست منطقی‌تر است.

۳. معرفی محل انجام آزمایش و ملاحظات زمین‌شناسی

از آنجا که در این پژوهش هدف دستیابی به نتایجی در خصوص خاک‌های ماسه‌یی است، از این رو شهر ساحلی سرخ‌رود به عنوان محل انجام آزمایش انتخاب شده



شکل ۷. هدایت لوله‌ی فولادی به درون غلاف.



شکل ۸. تجهیزات خارج کردن غلاف از داخل خاک.

که غلاف پایین‌تر از سطح خاک درون آن قرار گیرد تا از ریزش جداره‌ی خاک به درون غلاف جلوگیری شود. به این ترتیب شمع‌ها حفاری می‌شوند. در مرحله‌ی بعد، آرماتورگذاری و سپس بتن‌ریزی انجام خواهد شد. در شمع‌ها از ۴ آرماتور آجدار نمره‌ی ۸ که دور آن به صورت مارپیچ مفتول شده استفاده شده است، و در مجموع تلاش شده است که فولادگذاری در حدی باشد که بدنه‌ی شمع دچار گسیختگی نشود و به عبارتی سازه‌ی شمع قبل از خاک گسیخته نشود. قبل از انجام بتن‌ریزی لازم است تا فاصله‌ی سطح زمین با کف گودال که برابر با طول شمع‌هاست، به طور دقیق اندازه‌گیری شود و سپس بتن‌ریزی انجام شود. غلاف‌های PVC در هنگام بتن‌ریزی باید از درون خاک خارج شوند. این کار باید دقیقاً همانند ورود لوله‌ها به آرامی انجام شود که منجر به دست‌خوردگی زیاد خاک نشود. از طرفی خروج غلاف باید در جهت شاغولی باشد. بدین منظور از همان چهارپایه‌ی حفاری استفاده شده است و آن را در بالای غلاف‌ها قرار داده، به‌طوری که محور آن با محور غلاف هم‌امتداد شود. بیرون‌کشیدن غلاف‌ها با کمک سورج‌کردن جداره‌ی آن‌ها و بالاکشیدن آن‌ها با طناب انجام می‌شود. برای فراهم‌کردن نیروی کششی از قرقره با ظرفیت ۱/۵ تن استفاده شده است. تجهیزات لازم جهت بیرون‌آوردن غلاف‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

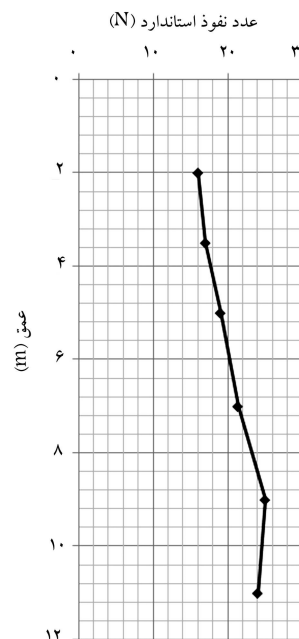
در این پژوهش، از ۱۲ شمع بتنی با ابعاد کوچک استفاده شده است. در انتخاب ابعاد این شمع‌ها به این صورت عمل شده است که از هر شمع، ۳ نمونه با اندازه‌ی تقریباً یکسان موجود باشد و در واقع، در کل ۴ دسته شمع با ابعاد متفاوت آزمایش می‌شود. هدف این است که اگر در طول آزمایش یک شمع، اشتباهی رخ دهد و نتیجه‌ی غیرقابل قبول حاصل شود، از مقایسه با نتایج دو شمع دیگر و از مراحل

جدول ۱. میانگین نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی خاک.

z (m)	ω (%)	Gs	Cu	Cc	e	Fc (%)
۱/۰	۳/۷	۳/۰۵	۱/۶۲	۱/۰۰	۰/۸۲	۰/۱۷

جدول ۲. پارامترهای مقاومتی و وزن مخصوص خاک.

z (m)	γ_{dry} (kN/m ^۳)	γ_{wet} (kN/m ^۳)	C (kpa)	ϕ°	Ncor
۱/۰	۱۶/۴۵	۱۷/۰۶	۶/۰	۳۳	۲۰



شکل ۶. نمودار تغییرات عدد نفوذ استاندارد نسبت به عمق.

۴. احداث شمع‌ها

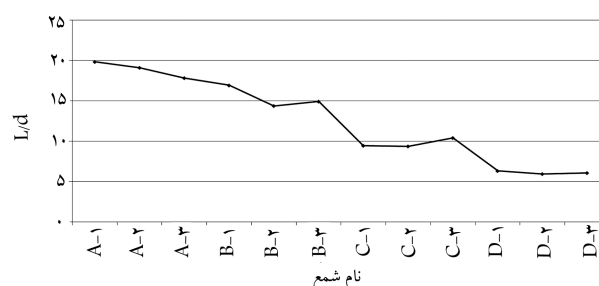
برای انجام عملیات حفاری در این پژوهش، از غلاف استفاده شده است. از آنجا که شمع‌های مورد آزمایش کوچک هستند و بیرون‌آوردن غلاف نیروی زیادی لازم ندارد، از لوله‌های PVC فشار قوی استفاده شده است. این لوله‌ها از آنجا که سطح نسبتاً صاف و صیقلی‌تری نسبت به لوله‌های فولادی دارند، کم‌تر موجب دست‌خوردگی خاک اطراف می‌شوند و از طرفی آسان‌تر خارج می‌شوند. در ساخت شمع‌ها با توجه به قطرهای موجود در بازار از لوله‌هایی با قطر ۱۱، ۱۲/۵ و ۱۶ سانتی‌متر و طول‌های مختلف استفاده شده است.

حفاری با کمک یک چهارپایه‌ی فلزی انجام می‌گیرد (شکل ۷). به این ترتیب که ابتدا غلاف در محل خود روی زمین قرار داده می‌شود و سپس اپراتور یک لوله‌ی سبک فولادی جدار نازک با ضخامت جداره‌ی ۲ میلی‌متر و قطر ۶ سانتی‌متر و طول ۲/۵ متر را در دست می‌گیرد و آن را داخل غلاف حفاری قرار می‌دهد و رها می‌کند. به این ترتیب لوله‌ی فولادی حدود ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر به درون خاک نفوذ می‌کند و همانند نمونه‌گیر دوکفه‌یی، خاک را می‌بلعد. سپس لوله‌ی فولادی از درون غلاف خارج شده و خاکی که به همراه آورده خارج می‌شود. این کار تکرار می‌شود، به‌طوری که یک لایه‌ی تقریباً ۱۰ سانتی‌متری از خاک حفاری و سپس غلاف با کمک فشار استاتیکی به درون خاک هدایت می‌شود. در تمام این مراحل همواره دقت می‌شود

جدول ۳. نحوه نامگذاری شمع‌ها.

نام شمع	d (cm)	L (cm)	(L/d)
A-۱	۱۱	۲۱۸	۱۹٫۸
A-۲	۱۱	۲۱۰	۱۹٫۱
A-۳	۱۱	۱۹۶	۱۷٫۸
B-۱	۱۱	۱۸۶	۱۶٫۹
B-۲	۱۱	۱۵۸	۱۴٫۴
B-۳	۱۱	۱۶۴	۱۴٫۹
C-۱	۱۲٫۵	۱۱۸	۹٫۴
C-۲	۱۲٫۵	۱۱۷	۹٫۴
C-۳	۱۲٫۵	۱۳۰	۱۰٫۴
D-۱	۱۶	۱۰۱	۶٫۳
D-۲	۱۶	۹۵	۵٫۹
D-۳	۱۶	۹۷	۶٫۱

L: طول مدفون شمع؛ d: قطر شمع؛



شکل ۹. نمودار نسبت طول به قطر شمع‌ها بر حسب نام آنها.

تجزیه و تحلیل حذف شود. به این ترتیب با همبستگی نتایج دو آزمایش دیگر می‌توان از درستی نتایج آن‌ها اطمینان حاصل کرد. از طرفی در انتخاب ابعاد این شمع‌ها سعی شده است تا نسبت طول به قطرهای متفاوتی (L/d) از شمع‌ها را پوشش داد. ابعاد شمع‌های حفاری شده به همراه نام آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول شمع‌ها در ۳ گروه قرار داده شده‌اند و در هر گروه قطر شمع‌ها یکسان و طول آن‌ها تقریباً با هم برابر است. شکل ۹، نمودار نسبت طول به قطر این شمع‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شمع‌ها نسبت طول به قطر (L/d) از ۶ تا ۲۰ را پوشش داده‌اند. معمولاً در شمع‌های بلند و لاغر L/d بزرگ‌تر از ۲۰ و در شمع‌های کوتاه کم‌تر از ۲۰ است. با توجه به اینکه در مناطق شمالی کشور غالباً از شمع‌های کوتاه با L/d کم‌تر از ۲۰ استفاده می‌شوند، از این رو در این پژوهش سعی شده است که این شمع‌ها مورد توجه قرار گیرند تا شاید نتایج آن در مقیاس واقعی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۵. آزمایش بارگذاری فشاری شمع‌ها در محل

جهت انجام آزمایش بارگذاری فشاری از استاندارد ASTM D ۱۱۴۳-۸۱ استفاده شده است.^[۱۹] در این پژوهش از وزنه‌های بتنی با ابعاد $۸۰ \times ۸۰ \times ۱۸۰$ سانتی‌متر و وزن حدود ۲٫۷ تن، جهت فراهم کردن عکس‌العمل استفاده شده است. این وزنه‌ها روی تیوروقی به طول ۶ متر و وزن حدود ۱ تن قرار می‌گیرند. این تیوروق از ورق‌های ۲۵ میلی‌متر و با سخت‌کننده در محل اعمال بار متمرکز ساخته

شده است. شکل ۱۰، وزنه‌های سربار به همراه تیوروق و نحوه قرارگیری آن‌ها را نشان می‌دهد.

برای اعمال بارگذاری از جک هیدرولیکی با کورس ۱۵ سانتی‌متر و ظرفیت ۵۰ تن که در زیر تیوروق نصب می‌شود، استفاده شده است. قطر خارجی بدنه جک ۱۲٫۷ سانتی‌متر و قطر شفت بارگذاری ۷۹٫۵ میلی‌متر است.

جهت اندازه‌گیری نیرو از نیروسنج دیجیتالی، که با کمک یک سیم رابط به یک نمایشگر متصل شده و بین جک و شمع قرار گرفته است، و جهت اعمال نیرو بر روی شمع از صفحات صلب فولادی استفاده شده است. تجهیزات فوق در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



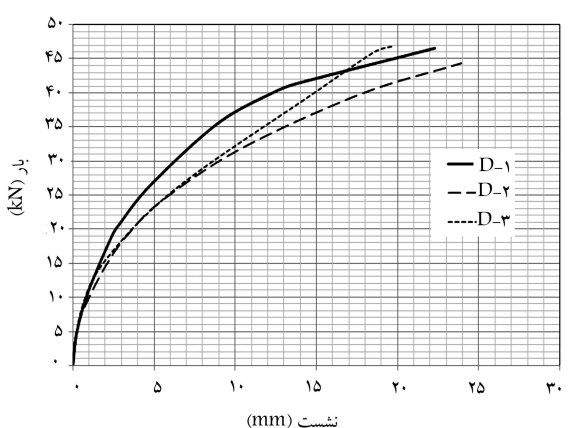
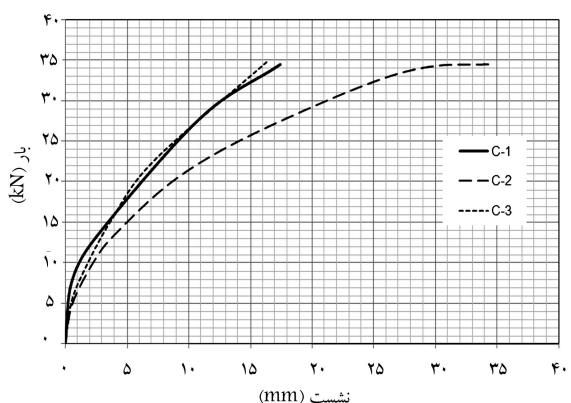
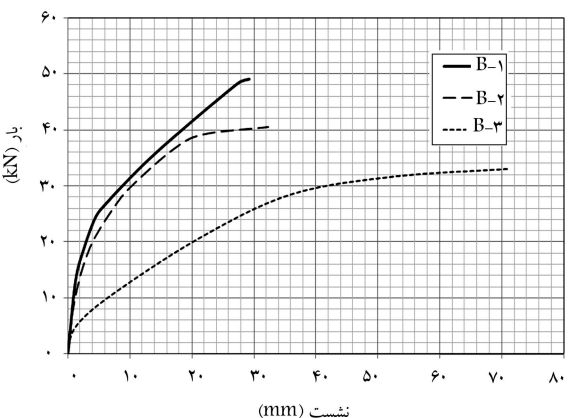
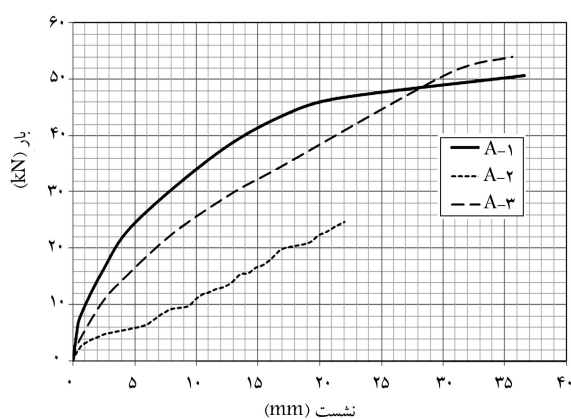
شکل ۱۰. نحوه قرارگیری وزنه‌ها روی تیوروق آزمایش بارگذاری.



شکل ۱۱. تجهیزات اندازه‌گیری نیرو و جابجایی شمع.



شکل ۱۲. نمایشگر نیرو.



شکل ۱۳. منحنی بار - نشست آزمایش بارگذاری شمعی.

جهت اندازه‌گیری جابجایی شمعی از دو گیج عقربه‌یی به دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و کورس ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است، که در دو طرف شمعیها نصب و میانگین قرائت آنها جهت تعیین جابجایی شمعی استفاده شده است. این تذکر لازم است که گیج‌ها بر روی دو تیر آهن، که در فاصله‌ی بیش از ۱/۵ متر از بدنه‌ی شمعی روی تکیه‌گاه قرار دارند، به صورت مغناطیسی متصل شده‌اند.

در این پژوهش، آزمایش به روش نرخ نفوذ ثابت (CRP) به ازا نفوذ مشخصی به اندازه‌ی ۰/۷۵ تا ۲/۵ میلی‌متر در دقیقه انجام شده است. بارگذاری آنقدر ادامه یافته است تا لحظه‌ی گسیختگی فرا برسد و شمعیها بدون افزایش بار در خاک فرو روند و یا اینکه نشست شمعی به حداقل ۱۵٪ قطر شمعی برسد. از آنجایی که خاک منطقه‌ی مورد مطالعه، از نوع دانه‌یی با بیشینه‌ی درصد رطوبت ۴٪ است و تراز سطح آب نیز پایین‌تر از نوک شمعی است، بنابراین شرایط زهکشی شده حاکم است.

۶. نتایج آزمایش بارگذاری شمعیها

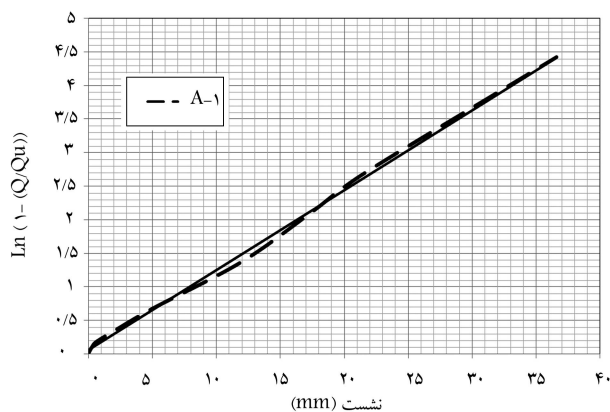
منحنی تغییرات بار بر حسب نشست حاصل از آزمایش بارگذاری ترسیم شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که منحنی بارگذاری شمعیهای B-۳ و A-۲ از نتایج منحنیهای دیگر فاصله‌ی زیادی دارد و نمی‌تواند درست باشد (شکل ۱۳). در مطالعه‌یی نیز علت بروز منحنیهای مشابه A-۲، وجود فاصله و گپ در طول شمعی بیان شده است که با اعمال بارگذاری این فواصل بسته می‌شود.^[۲۰] این مسئله در هنگام بارگذاری کاملاً محسوس است و منحنی بارگذاری حالت پلکانی به خود گرفته است، در حالی که در هیچ‌یک از شمعیها این روند پلکانی مشاهده نشده است. این بازشدگی‌ها ممکن است در هنگام بیرون کشیدن غلاف به وجود آمده باشد. بنابراین از آنجا که طول واقعی این شمعی معلوم نیست، به همین دلیل بارگذاری متوقف شده است. در همان مطالعه، دلیل رخداد منحنیهای مشابه B-۳، وجود بتن ضعیف در طول شمعی و یا گسیختگی برشی آن در هنگام بارگذاری ذکر شده است. این ضعف می‌تواند به علت عدم تراکم مناسب بتن بعد از بتن‌ریزی باشد. نشست در شمعی B-۳ حدود ۴ برابر شمعیهای هم‌گروه‌اش است که در هیچ‌یک از بارگذاریهای مشاهده نشده است و از میانگین نتایج شمعیهای هم‌گروه خود فاصله‌ی زیادی گرفته است. بنابراین، این منحنیها از مطالعات حذف شده‌اند و نتایج آزمایش برای ۱۰ شمعی باقیمانده مبنای تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۷. تعیین ظرفیت باربری نهایی شمعیها از روی منحنی

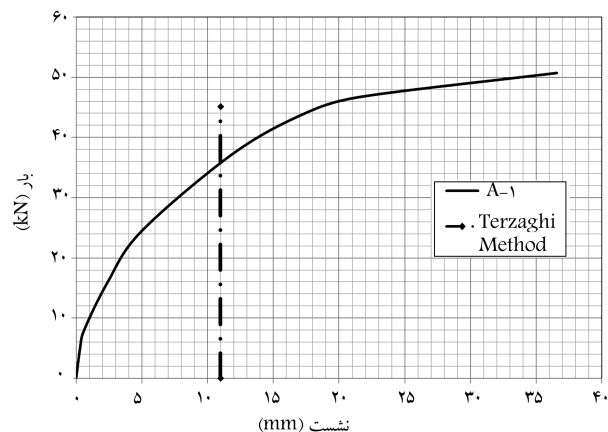
بار - نشست

جهت تعیین ظرفیت باربری نهایی شمعیها از روی منحنی بارگذاری روش‌های متعددی بیان شده است. در این بخش با کمک هریک از این روش‌ها ظرفیت باربری شمعیهای مورد آزمایش تخمین زده شده است. به عنوان نمونه در شکل‌های ۱۴ الی ۱۸، نحوه‌ی تعیین ظرفیت باربری نهایی با کمک روش‌های مختلف برای شمعی A-۱ نشان داده شده است.

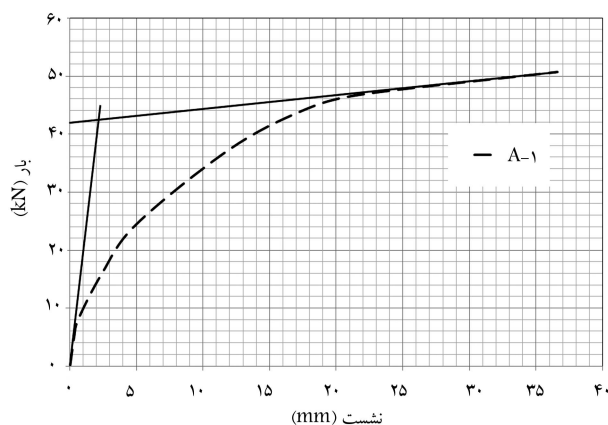
جدول ۴ و شکل ۱۹ نتایج ظرفیت باربری نهایی شمعیها را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش Davisson در این پژوهش اعداد را خیلی محافظه‌کارانه به دست می‌دهد و در واقع کم‌ترین مقادیر ظرفیت باربری را به خود اختصاص داده است. این نتیجه با نتایج به دست آمده‌ی پیشین که آزمایشی مشابه را در خاک ماسه‌یی تمیز با چگالی متوسط انجام داده‌اند،^[۱۰،۸] مطابقت دارد. مقادیر



شکل ۱۷. تخمین بار نهایی شمع A-1 به روش Vander Veen.



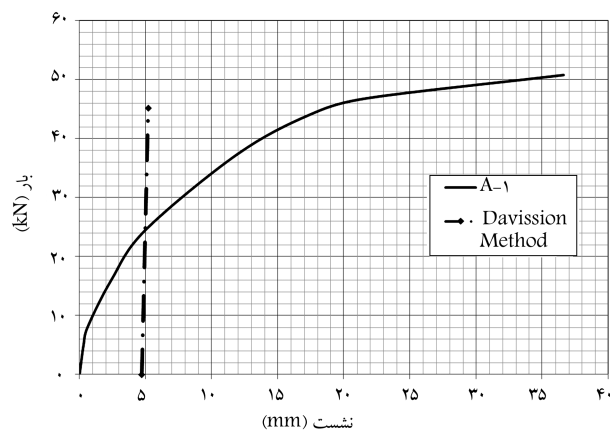
شکل ۱۴. تخمین بار نهایی شمع A-1 به روش Terzaghi.



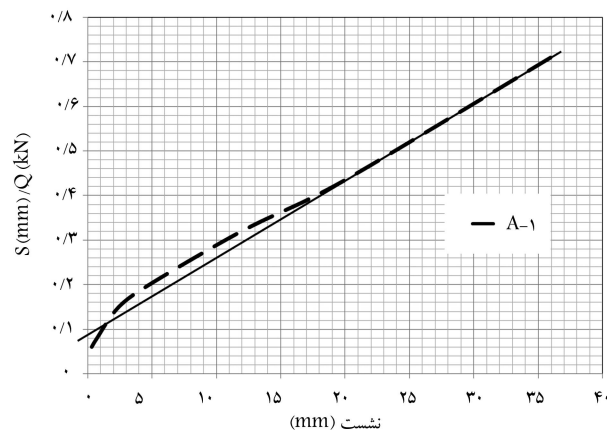
شکل ۱۸. تخمین بار نهایی شمع A-1 به روش ترسیم دو خط مماس.

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج تخمین بار نهایی شمع‌ها.

بار نهایی شمع (kN)						
نام روش						
نام شمع	[۶]	[۷]	[۱۱]	[۱۴]	[۲۰]	میانگین
A-۱	۳۵٫۶	۲۴٫۸	۵۷٫۷	۵۰٫۱	۴۲٫۷	۴۲٫۲
A-۳	۲۷٫۰	۱۶٫۸	۷۵٫۰	۷۰٫۰	۴۲٫۳	۴۱٫۷
B-۱	۳۲٫۳	۲۵٫۰	۶۱٫۵	۴۵٫۹	۴۱٫۹	۴۱٫۳
B-۲	۳۰٫۷	۲۱٫۸	۴۶٫۹	۴۰٫۳	۳۷٫۰	۳۵٫۳
C-۱	۲۹٫۴	۱۷٫۷	۵۹٫۱	۴۰٫۵	۲۰٫۵	۳۳٫۴
C-۲	۲۳٫۵	۱۴٫۹	۳۸٫۳	۳۷٫۰	۲۳٫۰	۲۹٫۳
C-۳	۲۹٫۸	۱۸٫۵	۶۰٫۰	۴۱٫۶	۱۵٫۵	۳۳٫۱
D-۱	۴۲٫۷	۲۷٫۵	۵۸٫۳	۴۸٫۷	۳۵٫۸	۴۲٫۶
D-۲	۳۷٫۹	۲۳٫۵	۶۳٫۶	۴۸٫۹	۳۴٫۵	۴۱٫۷
D-۳	۴۱٫۹	۲۳٫۵	۶۶٫۷	۵۸٫۵	۳۸٫۰	۴۵٫۷



شکل ۱۵. تخمین بار نهایی شمع A-1 به روش Davisson.



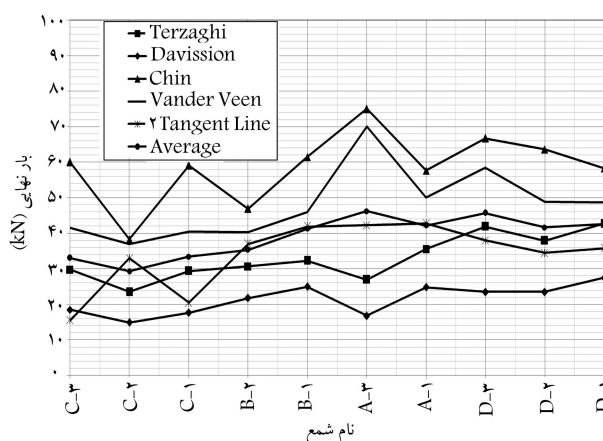
شکل ۱۶. تخمین بار نهایی شمع A-1 به روش Chin.

ظرفیت باربری به روش ترسیم دو خط مماس و روش Terzaghi با میانگین نتایج سازگاری خوبی دارد.

روش Terzaghi، که بر اساس نشست‌ی برابر با ۱۰٪ قطر شمع است، اعداد منطقی‌تری را در این مطالعه به دست می‌دهد که با نتایج Fellenius، نیز مطابقت دارد. روش Chin و Vander Veen ظرفیت باربری‌های بالاتری را به دست می‌دهد. علت این است که در این روش‌ها مقدار نشست اهمیتی ندارد، بلکه لحظه‌ی گسیختگی شمع زمانی است که شمع بدون افزایش بار در

خاک فرو رود. روش ترسیم خطوط مماس نیز رفتاری بینابین را تجربه کرده است.

جهت انجام یک بررسی تحلیلی بر روی نتایج آزمایش‌ها لازم است تا ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها و یا بار مجاز شمع‌ها با کمک یکی از روش‌های ذکرشده تعیین شود. انتخاب هریک از روش‌ها به کمک قضاوت مهندسی انجام خواهد شد.



شکل ۱۹. نمودار تغییرات بار نهایی شمعی‌ها بر حسب نام شمعی در روش‌های مختلف.

جدول ۵. نتایج تخمین ظرفیت باربری نهایی شمعی‌ها به روش Terzaghi.

نام شمعی	Qu (kN)	L (cm)	d (cm)
A-۱	۳۵٫۶	۲۱۸	۱۱
A-۳	۲۷٫۰	۱۹۶	۱۱
B-۱	۳۲٫۳	۱۸۶	۱۱
B-۲	۳۰٫۷	۱۵۸	۱۱
C-۱	۲۹٫۴	۱۱۸	۱۲٫۵
C-۲	۲۳٫۵	۱۱۷	۱۲٫۵
C-۳	۲۹٫۸	۱۳۰	۱۲٫۵
D-۱	۴۲٫۷	۱۰۱	۱۶
D-۲	۳۷٫۹	۹۵	۱۶
D-۳	۴۱٫۹	۹۷	۱۶

به عنوان مثال، در این پژوهش تخمین ظرفیت باربری نهایی شمعی‌ها با کمک روش Terzaghi مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج تخمین ظرفیت باربری نهایی شمعی‌ها به این روش در جدول ۵ نشان داده شده است.

از مقایسه نتایج ظرفیت باربری شمعی‌ها، مشاهده می‌شود که در شمعی‌های گروه B مقادیر ظرفیت باربری بسیار به هم نزدیک است. از آنجا که طول شمعی A-۳ از شمعی‌های گروه B بزرگ‌تر است و قطر آن با شمعی‌های گروه B برابر است، از این رو ظرفیت باربری شمعی A-۳ نمی‌تواند کم‌تر از این شمعی‌ها باشد. بنابراین شمعی A-۱ جهت تجزیه و تحلیل نتایج می‌تواند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در گروه C مقادیر ظرفیت باربری شمعی‌های C-۱ و C-۳ نشان می‌دهد که

می‌توان یکی از این دو را ملاک عمل قرار داد. شمعی C-۲ عدد کمی را نشان می‌دهد. در ماسه‌ی جداره‌ی شمعی‌ها سهم کوچکی از ظرفیت باربری را به خود اختصاص می‌دهند و از این رو مقدار ظرفیت باربری کوچک شمعی C-۲ را نمی‌توان به اختلاف جزئی در طول آن نسبت داد.

در گروه D نیز به دلایل ذکر شده می‌توان یکی از شمعی‌های D-۱ و D-۳ را مبنای تجزیه و تحلیل قرار داد. از آنجا که طول شمعی‌ها دقیقاً با یکدیگر برابر نیستند، از این رو ترجیح داده شده است که میانگین نتایج استفاده نشود و در عوض از هر گروه یک نماینده انتخاب شود. به این ترتیب نتایج ظرفیت باربری ۴ شمعی A-۱، B-۲، C-۱ و D-۱ را می‌توان برای ارزیابی یک بررسی تحلیلی مورد استفاده قرار داد.

۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام یک سری آزمایش بارگذاری شمعی، ظرفیت باربری نهایی شمعی‌ها در خاک ماسه‌یی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انجام عملیات احداث شمعی دقت شده است که دست‌خوردگی کمی به خاک تحمیل شود. منحنی‌های بار-نشست شمعی‌ها در خاک ماسه‌یی محل با چگالی متوسط تقریباً سهمی شکل است. با در اختیار داشتن منحنی‌های بار-نشست شمعی‌ها، ظرفیت باربری نهایی شمعی‌ها با کمک روش‌های مختلف تخمین زده شده است.

در شمعی‌های این پژوهش، روش Davisson اعداد را خیلی محافظه‌کارانه به دست می‌دهد و این نتیجه با نتایج به دست آمده‌ی NeSmith و Siegel و Zheng و همکاران که آزمایشی مشابه را در خاک ماسه‌یی تمیز با چگالی متوسط انجام داده‌اند، سازگاری دارد. مقادیر متوسط ظرفیت باربری با روش ترسیم دو خط مماس و روش Terzaghi سازگاری خوبی دارد. روش Terzaghi که براساس نشست برابر با ۱٪ قطر شمعی است، اعداد منطقی‌تری را نشان می‌دهد که با نتایج Fellenius نیز مطابقت دارد. روش Chin و Vander Veen مقادیر بیشتری را برای ظرفیت باربری به دست می‌دهد.

جهت انجام یک بررسی تحلیلی بر روی نتایج آزمایش‌ها لازم است تا ظرفیت باربری نهایی شمعی‌ها و یا بار مجاز شمعی‌ها با کمک یکی از روش‌های فوق تعیین شود. انتخاب هر یک از روش‌ها به کمک قضاوت مهندسی انجام خواهد شد. در این پژوهش نشان داده شده است که با انتخاب روش Terzaghi جهت تخمین نتایج ظرفیت باربری که بر مبنای نشست است، نتایج ظرفیت باربری ۴ شمعی A-۱، B-۲، C-۱ و D-۱ را می‌توان برای ارزیابی یک بررسی تحلیلی مورد استفاده قرار داد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با کمک آزمایش‌های بارگذاری انجام شده، نتایج قابل اطمینانی در مورد شمعی‌ها به دست آمده است که می‌تواند مورد استفاده‌ی پژوهشگران قرار گیرد.

منابع (References)

- Omer, J.R., Delpak, R. and Robinson, R.B. "An empirical method for analysis of load transfer and settlement of single piles", *Geotech. Geol. Eng.*, **28**(4), pp. 483-501 (2010).

- AL-Homoud, A.S., Fouad, T. and Mokhtar, A. "Comparison between measured and predicted values of axial end bearing and skin capacity of piles bored in cohesion less soils in the arabian gulf region", *Geotechnical and Geological Engineering*, **21**(1), pp. 47-62 (2003).
- AL-Mhaidib, A.I. "Experimental investigation of the behavior of pile groups in sand under different loading

- rates", *Geotechnical and Geological Engineering*, **24**(4), pp. 889-902 (2006).
4. Randolph, M.F., *Load Transfer Analysis of Axially Loaded Piles*, RATAZ Version 4-2, User Manual, University of Western Australia, Perth (2003).
5. Abdelrahman, G.E., Shaarawi, E.M. and Abouzaid, K. S. "Interpretation of axial pile load test results for continuous flight auger piles", *Proc. of the 9th Arab Structural Engineering Conf.* (29 Nov.-1 Dec. 2003).
6. Terzaghi, K. "Discussion of the progress report of the committee on the bearing value of pile foundation", *Proc. ASCE*, **68**, pp. 311-323 (1942).
7. Davisson, M.T., *High Capacity Piles, Proceedings, Lecture Series Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, Chicago, 52 pp, (1972).
8. NeSmith, W.M. and Siegel, T.C. "Shortcomings of the davisson offset limit applied to axial compressive load tests on cast-in-place piles", *Proceedings, International Foundation Congress and Equipment Expo*, pp. 568-574 (2009).
9. Kulhawy, F.H. and Chen, J.R. "Axial compression behavior of augered cast-in-place (ACIP) piles in cohesionless soils", *Advances in Deep Foundations*, GSP 132, ASCE, pp. 275-289 (2005).
10. Zheng, W., Hart, T.P. and Roldan, R.A. "Load test analysis on augered pressure grouted displacement piles", *Proceedings, 32nd Annual Conference on Deep Foundations*, Colorado Springs, Deep Foundations Institute, pp.25-36 (2007).
11. Chin, F.K. "Estimation of the ultimate load of piles not carried to failure", *Proceedings 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, Singapore, pp. 81-90 (1970).
12. Chin, F.K. "Discussion: Pile tests-arkansas river project", *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE*, **9.7**(SM6), pp. 930-932 (1971).
13. Decourt, L. "Behavior of foundations under working load conditions", *Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Foz DoIguassu, Brazil, **4**, pp. 453-488 (1999).
14. Vander Veen, C. "The bearing capacity of a pile, proceedings", *3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, Zurich, pp. 84-90 (1953).
15. Fellenius, B.H. "The analysis of results from routine pile load tests", *Ground Engineering*, pp. 19-31 (1980).
16. Joshi, R.C. and Sharma, H.D. "Prediction of ultimate pile capacity from load tests on bored and belled, expanded base compacted and driven piles", *Proceedings, International Symposium on Prediction and Performance in Geotechnical Engineering*, Calgary, Alberta, Canada, pp. 135-144 (1987).
17. Fellenius, B.H. "What capacity value to choose from the results a static loading test", *Deep Foundation Institute, Fulcrum*, pp. 19-22 (Winter 2001).
18. Fellenius, B.H. "We have determined the capacity, then what?", *Deep Foundation Institute, Fulcrum*, pp. 23-26 (Fall 2001).
19. American Society for Testing and Materials (ASTM), *Natural Building Stones; Soil and Rock; Geotextiles*, Book of ASTM Standards, Volume 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1992).
20. Tomlinson, M.J., *Pile Design and Construction Practice*, London: Viewpoint Publications (2004).